

Вклад России в Международный полярный год 2007/08
Series: Contribution of Russia to International Polar Year 2007/08

Океанография и морской лёд

Oceanography and sea ice

Главный редактор тома

И.Е. Фролов

Editor-in-chief

I. Ye. Frolov

Редакционная коллегия

И.М. Ашик, Л.А. Тимохов, А.В. Юлин

Editorial Board

I.M. Ashik, L.A. Timokhov, A.V. Yulin

ООО «Паулсен». Москва – Санкт-Петербург
2011

Paulsen Editions. Moscow – Saint-Petersburg
2011

0-2013-0010



2. Океанологические процессы и особенности распределения гидрологических характеристик в период МПГ в Северном Ледовитом и Южном океанах

2.1 Арктический бассейн

Вертикальная термохалинная структура Северного Ледовитого океана в период МПГ2007/2008

*Л.А. Тимохов¹, И.В. Поляков², И.А. Дмитренко³,
С.А. Кириллов¹, Н.В. Лебедев¹*

*1 – Арктический и антарктический научно-исследовательский институт,
Санкт-Петербург, Россия*

2 – Международной Арктический научный центр, Фербанкс, США.

3 – Институт морских наук им. Лейбница, ИФМ-ГЕОМАР, Киль, Германия

Аннотация

Выделены крупномасштабные особенности вертикальной термохалинной структуры Арктического бассейна в период аномальных изменений в Арктике в 2007–2009 гг. и выполнен сравнительный анализ произошедших изменений с историческими данными. Главные черты вертикального термохалинного строения Арктического бассейна и арктических морей в 2007–2009 гг. кардинально не изменились, сохранилось различие кластеров вертикальных профилей температуры и солёности Евразийского и Амеразийского суббассейнов. Вместе с тем градации температуры и солёности естественных слоев и объёмы вод определенных градаций гидрологических характеристик в период 2007–2009 гг. претерпели изменения и в некоторых естественных слоях эти изменения относятся к разряду аномальных. Значительные изменения произошли в поверхностном слое океана. Летние процессы 2007 г. в поверхностном слое оказались экстремальными, и они сформировали значительные как положительные, так и отрицательные аномалии температуры и солёности на большей части акватории Арктического бассейна и арктических морей. Потепление вод атлантического происхождения в Евразийском суббассейне оказалось самым значительным за весь исторический период океанографических наблюдений в СЛО. Общий объём атлантических вод с температурой выше 0 °С и солёностью более 34,6 ‰ в 2007 г. вырос на 22 % по сравнению с 1970–1979 гг. В то же время внутри атлантической водной массы произошло изменение парциальных объёмов вод для разных градаций температуры. Изменения коснулись и более глубоких слоев. Объём нижних промежуточных вод с температурой от –0,4 °С до 0 °С и солёностью более 34,6 ‰ в 2007 г. уменьшился на 30 %. Нижележащие донные воды стали несколько теплее и менее солёными.

Введение

Термохалинная структура Северного Ледовитого океана (СЛО) является важнейшим показателем его состояния. При отсутствии систематических наблюдений за течениями на различных глубинах всего океана, данные по температуре и солености являются единственно измеряемыми параметрами СЛО, на основании которых можно составить представление о циркуляции вод (Тимофеев, 1957; Никифоров и Шнайхер, 1980; Aagaard, Swift, Carmack, 1985), произвести верификацию гидродинамических моделей (Holloway et al., 2007), получить оценки климатической изменчивости СЛО и его отдельных районов (Никифоров и Шнайхер, 1980; Polyakov et al., 2004, Polyakov et al., 2008).

Атмосферные процессы в Арктике в период МПГ 2007/08 стали одной из главных причин экстремального сокращения площади ледяного покрова в летний период, аномального распреснения и прогрева морской воды на освободившейся ото льда акватории Арктического бассейна и арктических морей (Фролов и др., 2009). Эти обстоятельства ставят актуальной задачу оценки вариаций температуры и солености воды в СЛО и установления масштабов изменений термохалинной структуры в целом. Большой массив океанографических данных, собранный в 2007–2009 гг., позволяет составить достаточно полное представление о термохалинном состоянии СЛО в период МПГ 2007/08 и оценить изменения температуры и солености, произошедшие в водных колонках океана от поверхности до дна.

При исследовании вертикальной термохалинной структуры используются понятия водных масс и термохалинный (ТС) анализ. Исследованию строения СЛО и определению водных масс (структурных зон) СЛО посвящено много публикаций (Ширшов, 1938; Тимофеев, 1948, Никифоров и Шнайхер, 1980; Aagaard, Swift, Carmack, 1985). По современным представлениям (Никифоров и Шнайхер, 1980) в строении Арктического бассейна выделяются четыре основные структурные зоны: поверхностная, промежуточная, глубинная (воды атлантического происхождения) и донная. Воды каждой зоны имеют характерные значения океанографических характеристик (температуры, солености, плотности, гидрохимических показателей) и пределы изменения параметров, которые в совокупности и составляют параметры конкретной структурной зоны.

Поверхностная структурная зона включает холодные, наиболее распресненные воды и располагается от поверхности до скачка плотности (первый экстремум второй производной плотности по глубине) на глубинах 15–50 м в зависимости от сезона. Этот слой, наиболее однородный по вертикали, занимает всю акваторию бассейна. Температура воды в слое преимущественно отрицательная, причем в зимнее время близка к температуре замерзания, и изменяется незначительно (от -1°C до $-1,7^{\circ}\text{C}$). В противоположность температуре, соленость поверхностного слоя варьирует в больших пределах. В Амеразийском суббассейне поверхностный слой более распреснен (соленость составляет 29–32 ‰), чем в Евразийском суббассейне (соленость составляет 31–34,5 ‰). Такое отличие является следствием различных региональных условий ледообразования и таяния льда, поступления материковых вод и особенностей циркуляции вод и льдов в регионе.

Промежуточная структурная зона располагается между поверхностным слоем и слоем атлантических вод на глубинах от 15–50 м до 100–200 м. Верхняя граница располагается, как указано выше, на глубине первого изгиба профиля плотности, а нижняя граница условно проходит на глубине положения второго

изгиба профиля плотности (второй экстремум второй производной плотности по вертикальной координате) и располагается близко к нулевой изотерме. В промежуточной структурной зоне располагается главный пикноклин АБ. В Евразийском суббассейне промежуточные воды составляют переходную зону от распресненных и холодных поверхностных вод к теплым и соленым атлантическим водам. Периодически здесь наблюдаются прослойки более холодных и сравнительно соленых вод, составляющих так называемый холодный халоклин. Холодный халоклин составляют воды, образующиеся в окраинных районах суббассейна в результате охлаждения и осолонения при ледообразовании и распространяющиеся вглубь бассейна иногда на значительное расстояние, так называемые «шельфовые воды» (Никифоров и Шнайхер, 1980). Но в центральной части суббассейна холодный халоклин может формироваться и в результате зимней конвекции. В Амеразийском суббассейне промежуточные воды наблюдаются на всей акватории и состоят из нескольких прослоек: из шельфовых вод, тихоокеанских вод летнего (летние тихоокеанские воды) и зимнего (зимние тихоокеанские воды) происхождения (Никифоров и Шнайхер, 1980).

Глубинную структурную зону составляют соленые и теплые воды атлантического происхождения, имеющие температуру воды выше изотермы 0°C , которую обычно и принимают за верхнюю и нижнюю границы слоя. Этот слой занимает всю акваторию АБ на глубинах 150–700 м. В Евразийском суббассейне атлантические воды имеют более высокую температуру ($0,7\text{--}4,0^{\circ}\text{C}$) и соленость 34,85–35,00 промилей, а в Амеразийском – более низкую ($0,4\text{--}1,0^{\circ}\text{C}$) и соленость 34,80–34,95 промилей.

Донные воды подстилают атлантические воды и в Евразийском суббассейне имеют более низкую температуру (до $-0,85^{\circ}\text{C}$) и соленость 34,90–34,99 промилей, а в Амеразийском имеют более высокую температуру (до $-0,50^{\circ}\text{C}$) и несколько большую соленость 34,94–35,00 промилей. Иногда целесообразно в слое донных вод выделить верхнюю часть, нижний промежуточный слой, который подстилает атлантические воды и снизу ограничивается изотермой $-0,40^{\circ}\text{C}$ в Амеразийском суббассейне и изотермой $-0,70^{\circ}\text{C}$ в Евразийском суббассейне.

В статье также будет использоваться понятие «естественного слоя вод океана», введенное Е.Г. Никифоровым. «Основной особенностью строения водных масс СЛО является их существование в виде устойчивых естественных гидрологических слоев. Каждый естественный слой состоит из генетически однородных вод, в пределах слоев совершаются и их макромасштабные движения... Внешние воздействия приводят лишь к изменению характеристик основных слоев (в основном – глубин залегания границ и, следовательно, толщин) но не сопровождаются их образованием или уничтожением. Исключение составляют шельфовые и тихоокеанские воды... Основные структурные образования океана *суть (наша вставка)* естественные слои, в пределах которых, как в оболочках, существуют водные массы и циркуляция вод» (Никифоров, 2002).

Целью данной статьи явилось выделение крупномасштабных особенностей вертикальной термохалинной структуры Арктического бассейна в период аномальных изменений в Арктике в 2007–2009 гг. и выполнение сравнительного анализа произошедших изменений с историческими данными. В работе основное внимание сосредоточено на центральной части СЛО – Арктическом бассейне (АБ), но также приводится информация об изменчивости температуры и солености в арктических морях.

1. Данные и метод исследования

Для анализа были использованы данные океанографических наблюдений морских и вертолетных экспедиций, дрейфующих станций «Северный Полус» (СП) и дрейфующих океанографических буев ИТР (Ашик и др., 2010). На акватории АБ были выделены области с наибольшим числом наблюдений за трех-летний период, для которых и выполнялся анализ с разделением на зимний и летний периоды.

Описание состояния океана выполнялось путем анализа вертикальных профилей температуры и солёности и кривых температурно-солёностных диаграмм (ТСД). Выделение структурных зон и естественных слоев производилось по вертикальным профилям гидрологических характеристик.

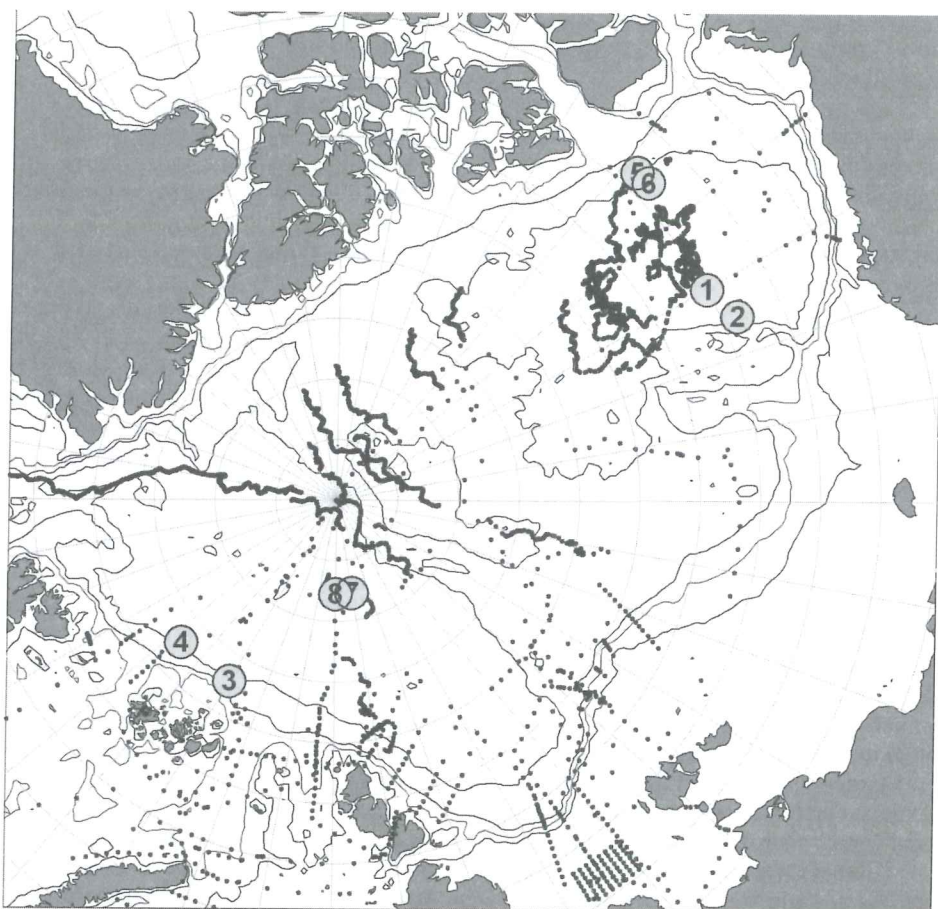


Рис.1. Положение океанографических станций, выполненных морскими арктическими экспедициями летом 2007 г., и данные ИТР за этот же период. Номера указаны места квадратов, для которых были выбраны океанографические станции и построены вертикальные профили на рис. 2 и 3

Для получения численных оценок состояния океана в целом и его изменений был применен метод объемного анализа вод. Для этой цели был составлен массив данных температуры и солености для лета 2007 г. (рис. 1), и выполнены расчеты объемов вод в пределах определенных градаций температуры и солености (Фролов и др., 2009). Следует отметить определенную формальность метода объемного анализа вод с позиций его использования для количественной оценки объемов конкретных водных масс и различных модификаций вод. Например, к градации солености от 31 ‰ до 32 ‰ и температуры от 0 °С до –0,4 °С относятся теплые тихоокеанские воды и воды Карского моря вблизи летней кромки льдов. Тем не менее, этот анализ позволяет рассчитать объемы вод определенной градации и получить общую количественную оценку изменчивости термохалинной структуры СЛО. При описании изменчивости тех или иных модификаций вод будем пользоваться таблицей 1, в которой нами дано соответствие градаций температуры и солености определенным водным массам и модификациям вод. В таблице 1 дополнительно введена градация для нижних промежуточных вод Евразийского и Амеразийского суббассейнов (НПрВЕБ и НПрВАБ), и нижней части верхнего промежуточного слоя (НЧПрВ), располагающейся глубже шельфовых и тихоокеанских вод и ограниченной верхней границей атлантических вод. В Евразийском суббассейне при отсутствии прослойки шельфовых вод и холодного халоклина НЧПрВ располагается непосредственно под поверхностным слоем и является зоной взаимодействия атлантических вод с поверхностным слоем.

Таблица 1. Соответствие характеристик водных масс и их модификаций градациям температуры и солености, использованное при расчетах объемов вод с помощью объемного анализа.

Обозначения: ЗПовВ и ЛПовВ – зимние и летние поверхностные воды; ЗТВ и ЛТВ – зимние и летние тихоокеанские воды; АВ – атлантические воды; НЧПрВ – нижняя часть верхнего промежуточного слоя; ДонВЕБ и ДонВАМБ – донные воды Евразийского и Амеразийского суббассейнов; НПрВЕБ и ПрВАБ – нижние промежуточные воды Евразийского и Амеразийского суббассейнов

Град. темп.	Градации солености							
	<30,0	30,0–31,0	31,0–32,0	32,0–33,0	33,0–34,0	34,0–34,5	34,5–35,0	>35,0
–1,9/ –1,4	ЗПовВ	ЗПовВ	ЗПовВ	ЗПовВ	ЗПовВ ЗТВ	ЗПовВ		
–1,4/ –0,7	ЛПовВ	ЛПовВ ЛТВ	ЛПовВ ЛТВ	ЛПовВ ЛТВ	ЛПовВ ЗТВ	НЧПрВ	ДонВЕБ	
–0,7/ –0,4	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	НЧПрВ	ДонВАМБ НПрВЕБ	
–0,4/ 0,0	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	НЧПрВ	НПрВЕБ НПрВАБ	
0,0/ +0,5	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ	ЛПовВ			АВ	АВ
0,5/ 1,0	ЛПовВ	ЛПовВ					АВ	АВ
1,0/ 1,5	ЛПовВ						АВ	АВ
1,5/ 2,0							АВ	АВ
>2,0							АВ	АВ

2. Особенности вертикального распределения температуры и солёности в период МПГ

Для анализа главных черт вертикального распределения гидрологических характеристик были выбраны четыре глубоководные станции, которые характеризовали отличительные особенности вертикальной термохалинной структуры Арктического бассейна в двух его суббассейнах – Евразийском и Амеразийском.

На рис. 2 приведены вертикальные профили температуры и солёности для летнего периода в 2007–2009 гг., а также температурно-солёностная диаграмма для этих станций. Из графиков видно, что подтверждается ранее установленное различие вертикального строения Амеразийского и Евразийского суббассейнов (Тимофеев, 1957; Никифоров и Шнайхер, 1980). Верхняя часть океана до глубины 1000 м в Амеразийском суббассейне менее солёная, чем в Евразийском. В этой же толще температура вод атлантического происхождения в Евразийском суббассейне значительно выше, чем в Амеразийском. Но под атлантическими водами до дна температура воды в Амеразийском суббассейне выше. Самым главным отличием в характере вертикальных профилей является наличие в температурных профилях Амеразийского суббассейна локального максимума температуры на глубинах 50–70 м в пределах изменения солёности 31–32 промили, как это видно на температурно-солёностной диаграмме на рис. 2 (Фролов и др., 2009). Этот максимум температуры ассоциируется с залеганием слоя летних тихоокеанских вод.

Таким образом, главные черты вертикального строения Арктического бассейна в 2007–2009 гг. сохранились, и различие кластеров вертикальных профилей температуры и солёности в Евразийском и Амеразийском суббассейнах в целом не изменилось. Однако температура и солёность естественных слоев, и объёмы вод определенных градаций гидрологических характеристик в период 2007–2009 гг. претерпели изменения. Подробный анализ вертикальной термохалинной структуры для нескольких произвольно выбранных станций,

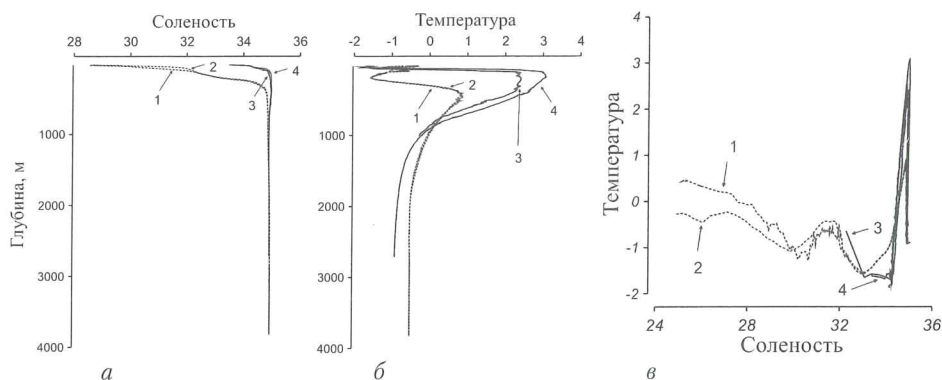


Рис. 2. Вертикальные профили солёности и температуры (а) и температурно-солёностная диаграмма (б) в Арктическом бассейне в летний период для характерных точек 1, 2 Амеразийского и 3, 4 Евразийского суббассейнов по результатам измерений экспедиций: 1 – C051, 05/09/2008; 2 – L.St. Laurant; 3 – NABOS–2009, 22/08/2009; 4 – Арктика-2007, 06/08/2007. Положение станций 1–4 указано на рис. 1.

изображенных на рис. 3, позволил выполнить оценку основных параметров состояния водной толщи, ее пространственную и временную изменчивость. Так, удалось установить, что максимальные отрицательные аномалии солености поверхностных вод по отношению к климатической норме наблюдались в Амеразийском суббассейне и достигали значений 4–6 промилле. В Евразийском суббассейне наблюдались положительные аномалии в поверхностном слое, их величина не превышала 1–2 промилле. Но в обоих случаях указанные аномалии выходят за рамки естественных вариаций, наблюдавшихся в течение исторического периода наблюдений. Например, в Амеразийской части СЛО величина аномалии в 2–4 раза превышает значения стандартного отклонения, рассчитанного для района выполнения станций по ряду многолетних данных 1950–1989 гг.

Отличия в вертикальной термохалинной структуре промежуточного слоя целиком определялись присутствием в Амеразийском суббассейне вод тихоокеанского происхождения, выраженных в виде одного или нескольких подповерхностных максимумов с температурами достигающими $-0,5...-0,3$ °C. Причем эти максимумы проявлялись как по данным летних, так и зимних гидрологических съемок (профили 1, 2 на рис. 2 и профили 1, 2, 5, 6 на рис. 3). Согласно же данным исторических наблюдений, ЛТВ Амеразийского суббассейна в зимний период должны быть выражены слабо или отсутствовать за счет потери тепла в результате осенне-зимней конвекции. Это позволяет говорить об аномальном термическом состоянии ЛТВ, которое подтверждается превышением аномалии температуры над характерной для этого района величиной стандартного отклонения примерно в 5–6 раз (рис. 3).

Глубинные атлантические воды имели наибольшие значения температур в Евразийской части СЛО в непосредственной близости от пролива Фрама, где эти воды проникают в Арктический бассейн. Поэтому вполне закономерно, что значения измеренных температур в центральной части Евразийского суббассейна оказались на $1,5-2,0$ °C выше температуры ядра АВ в Амеразийском секторе. При этом положительные аномалии температуры атлантических вод также демонстрируют существенно большие значения по сравнению со средними климатическими характеристиками в Евразийском суббассейне, где они доходят до $2,0$ °C. Тогда как в другой части СЛО эти аномалии не превышают $0,5$ °C (рис. 3). Но и в том и в другом случае наблюдаемые аномалии до двух раз превышали величину стандартного отклонения температуры в ядре АВ, что позволяет говорить об аномальности наблюдаемых изменений термического режима глубинных вод Арктического бассейна.

Анализ данных наблюдений показал, что в 2007 г. изменения произошли и в более глубоких слоях океана. О состоянии вод, которые находятся глубже АВ, дают представление карта температуры (рис. 4) и солености (рис. 5) на горизонтах 1500 и 2000 м, а также их аномалии.

Поля аномалий показывают, что температура нижних промежуточных вод, которые находятся непосредственно под АВ (горизонт 1500 м), была выше среднеклиматических на большей части Евразийского суббассейна и во впадинах Макарова и Подводников. При этом наибольшие значения аномалий были равны $+0,1$ °C. Соленость воды на этой глубине была меньше средней климатической, но в части Евразийского суббассейна, примыкающей к морю Лаптевых, и на севере Канадской котловины наблюдались зоны более соленых вод. На глубине 2000 м величины положительных аномалий температуры были несколько больше и наибольшие значения были равны $+0,14$ °C. Отрицательные аномалии соленос-

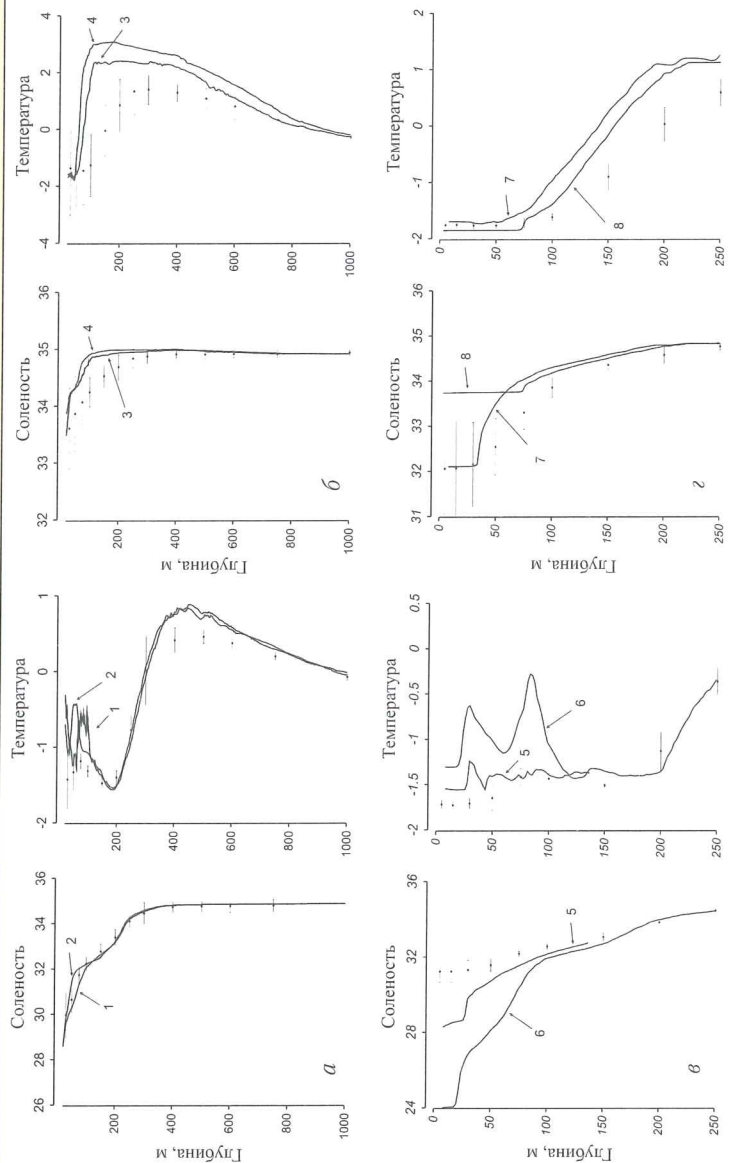


Рис. 3. Вертикальное распределение солёности и температуры в Американо-Азиатском ((а) и (б) – левая колонка профилей солёности и температуры) и Евразийском ((в) и (г) – правая колонка профилей солёности и температуры) суббассейнах для лета ((а) и (б)) и зимы ((в) и (г)). Черными точками показаны средние климатические значения и стандартные отклонения соответствующих характеристик по историческим данным «Базы океанографических данных СЛО» отдела океанологии ГУ «ААНИИ». Обозначения экспедиций, гидрологические станции которых использовались при построении вертикальных профилей: 1–4 – смотри рис. 2; 5 – ГТР–18, 18/01/2008; 6 – ГТР–11, 06/02/2009; 7 – ГТР–24, 15/01/2009; 8 – NPEO–2008, 12/04/2008. Положение станций 5–8 указано на рис. 1

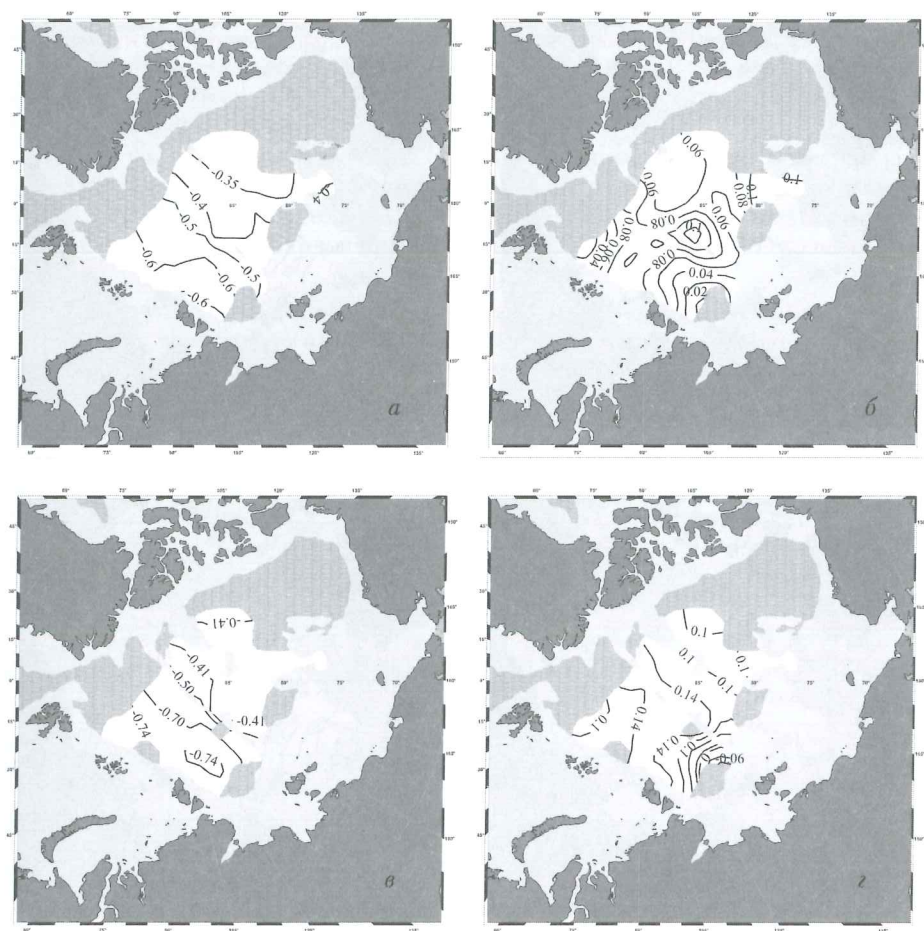


Рис. 4. Температура воды летом 2007 г. на горизонтах 1500 м (а) и 2000 м (в) и их аномалии ((б) и (г) – правая колонка)) по отношению к средним значениям для летнего сезона 1950–1989 гг. (Joint U.S.-Russian Atlas, 1997, 1998)

ти на этом горизонте уменьшились, и сократилась площадь их распространения. В то же время расширилась область положительных аномалий солёности и увеличились их значения.

Анализ изменчивости океанографических характеристик СЛО за период 2007–2009 гг. показал, что в 2008–2009 г. знаки аномалий температуры и солёности поверхностного слоя и слоя атлантических вод почти всюду сохранились, но величины аномалий по сравнению с 2007 г. несколько уменьшились. Т.е. изменения температуры и солёности СЛО от 2007 к 2009 г. дают основание предположить наличие тенденции к возврату термохалинной структуры к среднему климатическому состоянию.

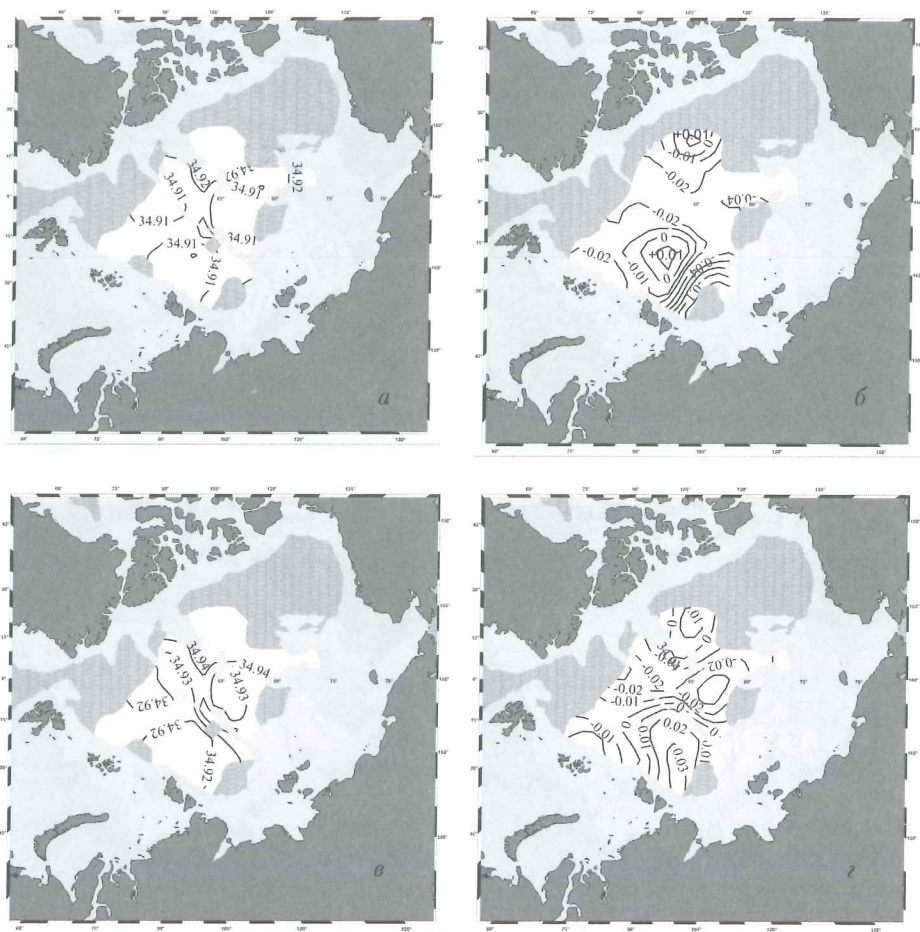


Рис. 5. Соленость воды летом 2007 г. на горизонтах 1500 м (а) и 2000 м (в) (левая колонка) и их аномалии ((б) и (г) – правая колонка) по отношению к средним значениям для летнего сезона 1950–1989 гг. (Joint U.S.-Russian Atlas, 1997, 1998).

3. Оценки изменений термохалинной структуры

Для получения интегральных оценок изменений, происшедших в толще океана, нами был выполнен объемный анализ водных масс по всем имеющимся в нашем распоряжении глубоководным океанографическим станциям летних сезонов 2007 г. и 1970–79 гг. В 1970–79 гг. наблюдалась низкая температура атлантических вод после потепления 40-х годов и перед началом потепления в 90-х годах прошлого столетия (Polyakov *et al.*, 2004), что позволяет использовать это десятилетие в качестве реперного. Чтобы не оперировать с большими величинами объемов вод, результаты расчетов объемов вод определенных градаций температуры и солености приводятся в метрах на единицу площади. Чтобы перейти к

величинам объема в м³ необходимо объем в м на единицу площади умножить на площадь глубоководной части (с глубиной более 200 м) Арктического бассейна и прилегающих арктических морей, равной $4,81 \times 10^9$ м². В таблице 2 приведены вычисленные объемы вод определенных градаций температуры и солёности для 2007 г. и 1970–1979 гг.

Путем расчетов были получены средневзвешенные значения температуры и солёности для всего анализируемого объема СЛО: для лета 2007 г соответственно +1,2 °С и 34,06 ‰ и для сезона 1970–1979 гг. +0,82 °С и 34,25 ‰. Из этих оценок следует, что от 70-х годов прошлого века до начала текущего столетия воды

Таблица 2. Величины объема вод (в метрах на единицу площади) определенных градаций температуры и солёности для 2007 г. (верхнее значение) и 1970–1979 гг. (нижнее значение)

Градации солёности (2007/1970–1979)	Градации температуры									
	(–2/–1,8)	(–1,8/–1,4)	(–1,4/–0,7)	(–0,7/–0,4)	(–0,4/0)	(0/0,5)	(0,5/1,0)	(1,0/1,5)	(1,5/2,0)	(2,0/10,0)
20,0/28,0	0	4,1	6,3	7,9	16,8	22,8	12,5	0	0	10
20,0/28,0	0	0	13,8	0	0,45	0,45	1,78	0	0,45	4,01
28,0/30,0	3	7,7	12,8	3,9	2	18,4	0,5	0	0,5	6,6
28,0/30,0	4,9	8,5	2,76	0,71	1,16	0,8	2,05	0,4	0	0
30,0/31,0	2,2	12,3	7,4	5,2	2	0,7	0,7	1	0,5	3,3
30,0/31,0	1,8	9,6	3,12	0,45	0,98	0,45	2,67	0	6,24	6,24
31,0/32,0	10,8	12	8,3	8,9	23,4	44,9	74,9	65,5	8,5	0
31,0/32,0	7	14	8,11	16,4	19,6	12,4	0	2,2	0	2,94
32,0/33,0	9	16,6	20,8	0,7	11	4,8	2,8	2,2	1	0
32,0/33,0	14	18	11,3	6,24	7,4	21,8	40,6	2,9	3,57	4,9
33,0/34,0	30,4	20,8	15,1	13,1	14,9	44,1	71,6	44,5	0	0
33,0/34,0	16	23	14,5	12,5	16,8	16,4	38,8	8,7	2,67	0,89
34,0/34,6	26,2	15,3	30,8	13,6	18,9	10,8	37,5	5,4	0	12,8
34,0/34,6	24	18	38,3	13,1	12,7	15,5	64,2	50	39,2	0
34,6/34,9	0	17,3	49	46,1	92,1	206,1	177	109,6	77,7	89,2
34,6/34,9	30	30	27,4	18,1	85,6	134	123	74	78,9	45,5
34,9/35,2	0	0	50,5	39	86,5	113,8	107,2	84	93,2	231,5
34,9/35,2	13	25	39	34,4	154	159	98,9	115	127	95,7
35,2/36,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35,2/36,0	6,9	25	51,3	12,9	118	62	47,8	7,8	35,7	4,9

Арктического бассейна и прилегающих арктических морей потеплели на 0,38 °C и соленость уменьшилась на 0,19 ‰.

Детальные изменения в термохалинной структуре, произошедшие за последние 30 лет, представлены в таблице 3, где показана разность между функциями распределения объемов вод 2007 и 1970–1979 гг. Положительные аномалии объема воды означают, что объем воды данной градации температуры и солености в 2007 г. был больше, чем таковой в 1970–1979 гг.

Таблица 3. Разность объемов вод (в метрах на единицу площади) определенной градации температуры и солености между 2007г. и десятилетием 1970–1979 гг.

Градация солености	Градация температуры									
	(–2/–1,8)	(–1,8/–1,4)	(–1,4/–0,7)	(–0,7/–0,4)	(–0,4/0)	(0/0,5)	(0,5/1,0)	(1,0/1,5)	(1,5/2,0)	(2,0/10,0)
20,0/28,0	0	4,1	–7,5	7,9	16,4	22,4	10,7	0	–0,4	6
28,0/30,0	–1,9	–0,77	10	3,2	0,84	17,6	–1,6	–0,4	0,5	6,6
30,0/31,0	0,42	2,673	4,28	4,8	1,02	0,25	–2	1	–5,7	–2,9
31,0/32,0	3,85	–2,17	0,19	–7,5	3,79	32,5	74,9	63,3	8,5	–2,9
32,0/33,0	–5,4	–1,85	9,48	–5,5	3,6	–17	–38	–0,7	–2,6	–4,9
33,0/34,0	14,1	–1,93	0,57	0,6	–1,9	27,7	32,8	35,8	–2,7	–0,9
34,0/34,6	2,31	–2,8	–7,5	0,5	6,15	–4,7	–27	–45	–39	13
34,6/34,9	–30	–12,5	21,6	28	6,52	72	54,1	35,7	–1,2	44
34,9/35,2	–13	–24,5	11,5	4,6	–67	–45	8,34	–31	–34	136
35,2/36,0	–6,9	–25,4	–51	–13	–118	–62	–48	–7,8	–36	–4,9

Для иллюстрации изменений термохалинной структуры по данным таблицы 3 была построена гистограмма распределения объемов вод для градаций солености и температуры, которая приведена на рис. 6. Столбики с белыми крышками изображают положительные аномалии объема воды (объем воды данной градации температуры и солености в 2007 г. больше, чем таковой в 1970–1979 гг.), а столбики с черными крышками изображают отрицательные аномалии объема вод (объем воды данной градации температуры и солености в 2007 г. был меньше, чем в 1970–1979 гг.).

Обращает на себя внимание то, что в 2007 г. объемы вод для градаций температуры выше 0,0 °C и солености воды меньше 32,00 ‰ намного превосходили таковые в 1970–1979 гг.

Аномальные процессы в поверхностном слое летом 2007 г. нашли отражение в том, что в интервалах температур от –0,4 °C до +1,0 °C и солености воды меньше 30,0 ‰ функция распределения аномалий имеет положительные значения.

Значительная трансформация объемов вод произошла для градаций температур и солености (0,0/+1,50 °C; 31,00/32,00 ‰) и (0,0/+1,0 °C; 32,00/33,00 ‰). Объем вод первой градации в 2007 г. увеличился по отношению к среднему значению величины объема вод с рассматриваемыми характеристиками для десятилетия 1970–1979 гг. в 5 раз. Основное изменение произошло за счет увеличения объема прогретых поверхностных баренцевоморских и летних тихоокеанских вод. Объем вод второй градации в 2007 г. в относительных единицах наоборот уменьшился почти в 9 раз.

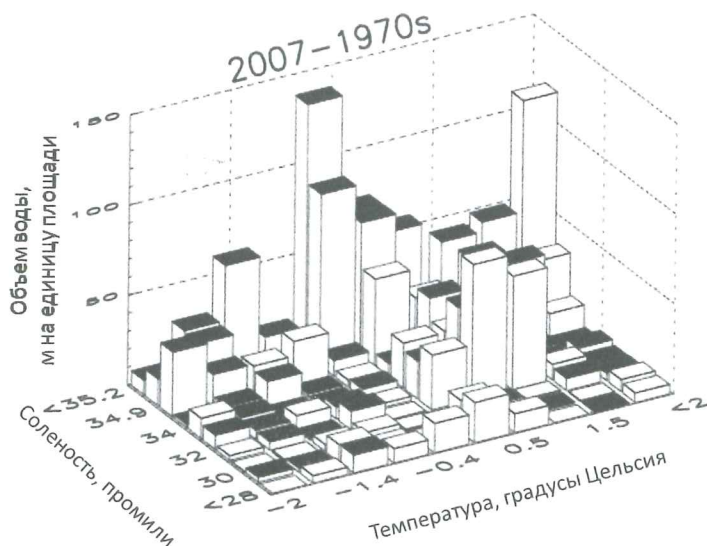


Рис. 6. Гистограмма разностей объемов воды между 2007 г. и 1970–1979 гг. определенной градации солености и температуры. Столбики с белыми крышками изображают положительные аномалии объема воды, а столбики с черными крышками изображают отрицательные аномалии объема вод.

Общий объем атлантических вод с температурой выше 0°C и соленостью более 34,6 ‰ в 2007 г. вырос на 22 % по сравнению с 1970–1979 гг. В то же время внутри атлантической водной массы произошло изменение парциальных объемов атлантических вод для разных градаций температуры. Так объем атлантических вод температурой от 0°C до 2°C уменьшился, а объем вод с температурой более $2,0^{\circ}\text{C}$ значительно увеличился. Такая существенная перестройка термохалинной структуры слоя атлантических вод явилась следствием увеличения за последние два десятилетия (особенно начиная с 2003–2004 гг.) поступления более теплых и менее соленых атлантических вод в Арктический бассейн (Polyakov et al., 2005).

Изменения коснулись и более глубоких слоев. Объем нижних промежуточных вод с температурой от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до 0°C и соленостью более 34,6 ‰ в 2007 г. уменьшился на 30 %. Нижележащие донные воды стали несколько теплее и менее солеными. Ранее отмечалась закономерность повышения температуры донных вод при повышении температуры атлантических вод в Арктическом бассейне (Никифоров и Шнайхер, 1980). И эта закономерность подтверждается нашим анализом.

Заключение

1. Океанографические данные, полученные в период МПГ 2007/08, позволили описать состояние Северного Ледовитого океана в период действия экстремальных процессов. Главные черты вертикального термохалинного строения Арктического бассейна и арктических морей в 2007–2009 гг. кардинально не изменились, сохранилось различие кластеров вертикальных профилей температуры и солености для Евразийского и Амерзийского суббассейнов.

2. Вместе с тем градации температуры и солёности естественных слоев и объёмы вод определенных градаций гидрологических характеристик в период 2007–2009 гг. претерпели изменения и в некоторых естественных слоях эти изменения относятся к разряду аномальных.

3. Выполненные с помощью объёмного анализа оценки изменений показывают, что от 70-х годов прошлого века до начала текущего столетия в Арктическом бассейне и прилегающих арктических морях воды потеплели на $0,38^{\circ}\text{C}$, и солёность уменьшилась на 0,19 ‰.

4. Значительные изменения произошли в поверхностном слое океана. Объёмы вод для градаций температуры выше $0,0^{\circ}\text{C}$ и солёности воды меньше 32,00 ‰ намного превосходили таковые в 1970–1979 гг. Летние процессы 2007 г. в поверхностном слое оказались экстремальными, и они сформировали значительные как положительные, так и отрицательные аномалии температуры и солёности на большей части Акватории Арктического бассейна и арктических морей.

5. Потепление вод атлантического происхождения в Евразийском суббассейне оказалось самым значительным за весь исторический период океанографических наблюдений в СЛО. Общий объём атлантических вод с температурой выше 0°C и солёностью более 34,6 ‰ в 2007 г. вырос на 22 % по сравнению с 1970–1979 гг. В то же время внутри атлантической водной массы произошло изменение парциальных объёмов вод для разных градаций температуры.

6. Изменения коснулись и более глубоких слоев. Объём нижних промежуточных вод с температурой от $-0,4^{\circ}\text{C}$ до 0°C и солёностью более 34,6 ‰ в 2007 г. уменьшился на 30 %. Нижележащие донные воды стали несколько теплее и менее солёными.

7. В 2008–2009 г. знаки аномалий температуры и солёности поверхностного слоя и слоя атлантических вод почти всюду сохранились, но величины аномалий по сравнению с 2007 г. несколько уменьшились. Т.е. изменения температуры и солёности СЛО от 2007 к 2009 г. дают основание предположить наличие тенденции к возврату стохастической структуры к среднему климатическому состоянию.

Статья подготовлена с использованием данных, полученных на основе приборной базы НЭС «Академик Федоров», усовершенствованной в рамках темы «Развитие приборной базы и проведение исследований в полярных областях Мирового океана с использованием уникальной установки научно-экспедиционное судно «Академик Федоров» (УСУ НЭС «Академик Федоров»)».

Литература

Аших И.М., Кириллов С.А., Макитас А.П., Смирнов В.Н., Соколов В.Т., Тимохов Л.А. Основные результаты морских исследований Арктики в XXI веке // Проблемы Арктики и Антарктики. 2010, №1 (84), с. 100–115.

Никифоров Е.Г., Шнайхер А.О. Закономерности формирования крупномасштабных колебаний гидрологического режима Северного Ледовитого океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1980, 269 с.

Никифоров Е.Г. Стеродинамическая система Северного Ледовитого океана. – Санкт-Петербург, ААНИИ, 2006, 174 с.

Тимофеев В.Т. Атлантические воды в Арктическом бассейне // Проблемы Арктики, 1957, Вып. 2, с. 41–52.

Тимофеев В. Т. Водные массы центральной зоны Северного Ледовитого океана // Труды Второго всесоюзного географического съезда, М., Географ-гиз, 1948, Т. II.

Фролов И.Е., Ашик И.М., Кассенс Х., Поляков И.В., Прошутинский А.Ю., Соколов В.Т., Тимохов Л.А. Аномальные изменения термохалинной структуры Северного Ледовитого океана. ДАН, 2009, Т. 429, №5, с. 688–690.

Шуршов П.П. Океанологические наблюдения // Докл. АН СССР, 1938, Т. XIX, №8, с. 569–580.

Aagaard K., Swift J.H., Carmack E.C. Thermohaline circulation in the Arctic Mediterranean Seas // J. Geophys. Res., Vol. 90, No. C5, May 20, 1985, P. 4833–4846.

Holloway G., Dupont F., Golubeve E., Hakkinen S., Hunke E., Jin M., Karcher M., Kauker F., Maltrud M., Maqueda M.A.M., Maslovski W., Platov G., Stark D., Steel M., Suzuki T., Wang J., Zhang J. Ware properties and circulation in Arctic Ocean models // J. Geophys. Res., 2007, -112, C04S03, doi: 10.1029/2006JC003642.

Polyakov I.V., Alekseev G.V., Timokhov L.A., Bhatt U., Colony R.L., Simmons H.L., Walsh D., Walsh J.E., Zakharov V.F. Variability of the

intermediate Atlantic Water of the Arctic Ocean over the last 100 years. // J. Climate, 2004, P. 4485–4497

Polyakov I. V., Beszczynska A., Carmack E.C., Dmitrenko I.A., Fahrbach E., Frolov I.E., Gerdes R., Hansen E., Holfort J., Ivanov V., Jonson M., Karcher M., Kauker F., Morison J., Orvik K., Schauer U., Smmons H., Skagseth O., Sokolov V., Steel M., Timokhov L., Walsh D., Walsh J.E. One more step toward a warmer Arctic // Geophys. Res. Lett., 32, L17605, doi:10.1029/2005GL023740 2005. P. 1–4.

Polyakov I. V., Alexeev V. A., Belchansky G. I., Dmitrenko I. A., Ivanov V. V., Kirillov S. A., Korablev A. A., Steele M., Timokhov L. A., Yashayaev I. Arctic Ocean Freshwater Changes over the Past 100 Years and Their Causes // Journal of Climate, Vol. 21, No. 2, 15 January 2008, P. 364–384.

Joint U.S.-Russian Atlas of the Arctic Ocean, Oceanography Atlas for the Winter (1997) and Summer Period (1998). Ed. by F. Tanis, L. Timokhov. Environmental Working Group, University of Colorado, Boulder, CD-ROM.

The vertical thermohaline structure of the Arctic Ocean during IPY 2007/08 period

L.A. Timokhov¹, I.V. Polyakov², I.A. Dmitrenko³,
S.A. Kirillov¹, Н.В. Лебедев¹

1 – Arctic and Antarctic Research Institute, Saint Petersburg, Russia

2 – International Arctic Research Center (IARC), USA

3 – Leibniz-Institut fuer Meereswissenschaften, IFM-GEOMAR, Germany

Abstract

The large scale features of the vertical thermohaline structures in the Arctic Ocean during 2007–2009 were considered to reveal the changes in temperature and salinity in comparison with the historical data. In general, the main features of vertical thermohaline structures have remained unchanged over the Arctic and demonstrate the frontal barrier area between Eurasian and American basins. However, the unique summer atmospheric forcing in 2007 resulted in the considerable thermohaline changes in the surface layer. The large areas of positive and negative anomalies in temperature and salinity have been formed over the Arctic Ocean.

The volumetric changes in the water masses with different temperature and salinity gradation have been also observed. The volume of Atlantic Waters with temperatures above 0 °C and salinity above 34,6 increased at 22 % in 2007 in comparison with 1970–1979 mean. The changes in the deeper layers have also been revealed. Thus, the volume of intermediate waters with temperatures ranged from –0,4 to 0 °C and salinities above 34,6 decreased at 30 % in 2007. The most saline and cold bottom waters became warmer and fresher.